

# 基于混合模型的 CCD 镜头畸变精校正算法

张佳成, 范勇, 陈念年

(西南科技大学计算机科学与技术学院, 绵阳 621010)

**摘要:** 针对机器视觉检测和高精度图像测量中使用的 CCD 镜头都存在不同程度光学畸变的问题, 提出基于混合模型的 CCD 镜头畸变校正算法。用经典模型对畸变图像进行初次校正, 用多面函数拟合法进行二次精校正, 用三次 B 样条函数进行灰度重建。实验结果表明, 该方法在不依赖摄像机内部参数条件下, 相比单一的镜头畸变校正模型, 精度提高, 鲁棒性增强, 校正后径向均方根误差为 0.3 个像素。

**关键词:** 镜头畸变; 校正算法; 混合模型

## High Precision Correction Algorithm for CCD Lens Distortion Based on Combined Model

ZHANG Jia-cheng, FANG Yong, CHEN Nian-nian

(College of Computer Science and Technology, South West University of Science and Technology, Mianyang 621010)

**【Abstract】** According to the different degree distortion of CCD lens used in machine visual detection and high precision measurement, this paper proposes a combined model-based for CCD lens distortion correction. The algorithm uses the classical model to correct the distortion image initially, the polyhedral function is employed for second high precision correction, and cubic B spline function is used for grade rebuilding. Experimental results indicate that the algorithm can promote the precision and strengthen the robustness compared with other single lens distortion correction model, and the radial correction RMS is 0.3 pixel.

**【Key words】** lens distortion; correction algorithm; combined model

### 1 概述

在机器视觉工业应用中,大量使用 CCD 来捕获目标景物的信息,由于镜头曲率误差及镜头加工和系统装配误差,因此系统成像较难满足理想的针孔成像模型,成像图像都有不同程度的畸变,给后续的图像分析和图像理解带来了困难。

目前已有许多镜头畸变校正方法,且校正效果良好。文献[1]修改了畸变校正的模型,使得畸变估计参数变少,却复杂了理想图像和畸变图像的映射关系。文献[2]采用基于直线的畸变校正方法,用 LM 算法对畸变参数进行估计,但存在初始值较难选取、局部值收敛等不足。文献[3]采用摄像机标定法,需要已知世界坐标系中的点和图像坐标系下像点的对应关系以及摄像机的内部参数,用多角度成像和迭代优化算法提高校正精度。文献[4]采用多项式模型对畸变图像校正,需要复杂的测量装置,且多项式校正模型缺乏数学理论依据。

本文在经典的畸变校正模型<sup>[5]</sup>中引入多曲面拟合法,简单易懂,不依赖摄像机的内部参数,不需要复杂的测量装置,不采用迭代优化算法,增强了畸变校正的鲁棒性,有效提高了畸变校正的精度,减小了畸变校正的误差。

### 2 畸变校正模型

#### 2.1 畸变校正经典模型

CCD 镜头的畸变可表示如下:

$$\begin{cases} x_d = u + \delta_u(u, v) \\ y_d = v + \delta_v(u, v) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $x_d$  和  $y_d$  表示畸变图像上的坐标;  $u$  和  $v$  表示理想图像上的坐标;  $\delta_u(u, v)$  和  $\delta_v(u, v)$  分别是  $u$  和  $v$  方向上的畸变量。通常畸变包含径向畸变、切向畸变和薄透镜畸变。

径向畸变是由摄像机镜头的曲率误差引起的,造成实际像高低于或高于理想像高,且是畸变组成部分中的主要成分。径向畸变分为桶形畸变和枕形畸变,径向畸变表示如下:

$$\begin{cases} \delta_{ur} = k_1 u(u^2 + v^2) + O[(u, v)^5] \\ \delta_{vr} = k_1 v(u^2 + v^2) + O[(u, v)^5] \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $k_1$  是径向畸变系数,低次项的畸变系数可校正 90% 以上的径向畸变量。

切向畸变是因为摄像机镜头组合时光学中心不是严格同轴造成的。切向畸变表示如下:

$$\begin{cases} \delta_{ud} = p_1(3u^2 + v^2) + 2p_2 uv + O[(u, v)^4] \\ \delta_{vd} = p_2(u^2 + 3v^2) + 2p_1 uv + O[(u, v)^4] \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $p_1$  和  $p_2$  是切向畸变系数。

薄透镜畸变来源于摄像机镜头组件设计、制造和装配过程。薄透镜畸变表示如下:

$$\begin{cases} \delta_{ud} = s_1(3u^2 + v^2) + 2s_2 uv + O[(u, v)^4] \\ \delta_{vd} = s_2(u^2 + 3v^2) + 2s_1 uv + O[(u, v)^4] \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $s_1$  和  $s_2$  是薄透镜畸变系数。

将径向畸变、切向畸变和薄透镜畸变组合,可得如下表达式:

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目“基于机器视觉的自准直技术研究”(10676029); 国家自然科学基金资助项目“强激光光学元件表面疵病检测技术研究”(10776028)

**作者简介:** 张佳成(1985-),男,硕士研究生,主研方向:机器视觉,图像处理;范勇,副教授、博士;陈念年,讲师、硕士

**收稿日期:** 2009-06-13 **E-mail:** jiaken2660@126.com

$$\begin{cases} \delta_u = k_1 u(u^2 + v^2) + p_1(3u^2 + v^2) + 2p_2 uv + s_1(u^2 + v^2) \\ \delta_v = k_1 v(u^2 + v^2) + p_2(3v^2 + u^2) + 2p_1 uv + s_2(u^2 + v^2) \end{cases} \quad (5)$$

将式(5)进行简单变换得:

$$\begin{cases} \delta_u = k_1 u(u^2 + v^2) + (s_1 + p_1)(u^2 + v^2) + 2p_1 u^2 + 2p_2 uv \\ \delta_v = k_1 v(u^2 + v^2) + (s_2 + p_2)(u^2 + v^2) + 2p_2 v^2 + 2p_1 uv \end{cases} \quad (6)$$

实际应用中, 径向畸变在  $u$  和  $v$  方向的畸变系数并不是一样的<sup>[6]</sup>, 所以, 对畸变校正模型稍作修改。用  $t_1 = s_1 + p_1$ ,

$t_2 = s_2 + p_2$ ,  $q_1 = 2p_1$ ,  $q_2 = 2p_2$  进行替换得

$$\begin{cases} \delta_u = k_1 u(u^2 + v^2) + t_1(u^2 + v^2) + q_1 u^2 + q_2 uv \\ \delta_v = k_1 v(u^2 + v^2) + t_2(u^2 + v^2) + q_2 v^2 + q_1 uv \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $k_1, k_2, t_1, t_2, q_1, q_2$  为新的畸变系数。

## 2.2 多面函数拟合法模型

Hardy于1971年首次提出多面函数拟合法, 并于1977年将其应用于地壳垂直变形分析。后来Gopfert将多项式模型和多面函数拟合法相结合应用于遥感图像处理。该方法基于这一理论: 任何一个圆滑的数学表面总可用一系列有规则的数学表面的总和以任意精度逼近。其方程的一般形式表示如下:

$$\xi_i = \sum_{j=1}^n \alpha_j Q(u, v, u_i, v_i) \quad (8)$$

其中,  $\alpha_i$  为待定系数;  $n$  为控制点的个数;  $Q(u, v, u_i, v_i)$  为  $u$  和  $v$  的二次核函数, 其中心点在  $(u_i, v_i)$  处;  $\xi_i$  可由二次函数式确定, 因此称为多面函数。

核函数可以任意选择, 一般选用具有对称性距离的正双曲面函数和倒双曲面函数, 即

$$\begin{cases} Q(u, v, u_i, v_i) = [(u - u_i)^2 + (v - v_i)^2 + \delta^2]^{1/2} \\ Q(u, v, u_i, v_i) = [(u - u_i)^2 + (v - v_i)^2 + \delta^2]^{-1/2} \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $\delta$  为圆滑因子, 也称光滑系数。通常  $\delta$  可取一小正数或 0。

将多面函数拟合法应用到图像畸变校正中时, 可得如下校正公式:

$$\begin{cases} \xi_{ui} = \sum_{j=1}^n \alpha_j Q(u, v, u_i, v_i) \\ \xi_{vi} = \sum_{j=1}^n \beta_j Q(u, v, u_i, v_i) \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $u$  和  $v$  表示参考图像(标定模板图像)上控制点的坐标;  $n$  表示控制点的个数;  $\xi_{ui}$  和  $\xi_{vi}$  分别表示控制点在  $u$  和  $v$  方向的畸变量;  $\alpha_i$  和  $\beta_i$  分别表示  $u$  和  $v$  方向的畸变系数;  $Q(u, v, u_i, v_i)$  表示当前控制点到其他控制点的欧式距离。应用已知控制点的坐标和偏差求出系数  $\alpha_i$  和  $\beta_i$ , 然后用式(10)求得其他像素点的畸变量, 结合式(1)就可以完成图像畸变校正过程的坐标变换。通过多面函数拟合模型建立的畸变图像控制点与参考图像控制点之间的映射为完全映射, 控制点之间的映射误差为 0。

## 2.3 混合模型

混合模型结合了畸变校正经典模型(C 模型)和多面函数拟合法模型(MQ 模型), 该方法类似于 Gopfert 算法。不同的是该混合模型建立在具有严格数学理论的畸变校正经典模型上, 且根据实验数据对经典模型稍作了修改, 克服了 Gopfert 算法采用没有数学理论依据的多项式校正模型的缺点。并将应用范围从遥感图像处理这一特殊领域拓宽到摄像机镜头畸变校正这一普遍问题中, 因此, 更具有普适性和鲁棒性。该方法首先用经典模型对图像进行校正, 然后用多面函数拟合模型进行二次精校正。具体算法思想如下:

(1)利用经典模型  $(x, y) = f(u, v)$  根据选取的控制点建立畸变图像与参考图像之间的映射关系, 将畸变图像上的控制点进行初次校正:

$$[x, y]^c = [C_x(u, v, x), C_y(u, v, y)] \quad (11)$$

(2)计算初次校正图像与参考图像上对应控制点的偏差:

$$[x, y]^f = [u, v] - [x, y]^c \quad (12)$$

(3)在第(1)步和第(2)步的基础上, 根据控制点用多面函数拟合模型再次建立初次校正图像与参考图像之间的映射关系, 求出多面函数拟合模型中系数:

$$[x, y]^{MQ} = [MQ_x(u, v, x^c), MQ_y(u, v, y^c)] \quad (13)$$

(4)对畸变图像用混合模型进行校正:

$$[x, y] = [x, y]^f + [x, y]^{MQ} \quad (14)$$

## 3 实验结果与分析

### 3.1 校正前预处理

在 VC6.0 环境下开发了具有畸变校正功能的应用程序, 采用 Webcom001 数码通信 M15 型摄像头为图像成像设备, 视场角为  $62^\circ$ , 焦距为 3.6 mm~6.0 mm, 图像格式为  $320 \times 240$ 。首先用摄像头获得标定模板的畸变图像, 见图 1, 并求出镜头的光学中心<sup>[7]</sup>为(152.01, 118.21)。

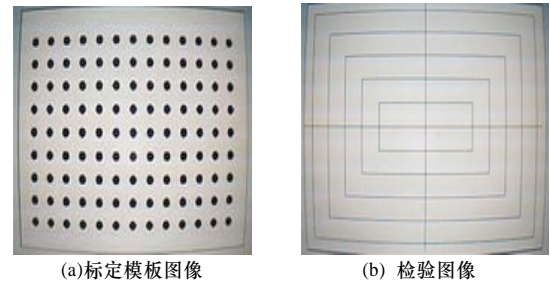


图 1 畸变图像

许多学者对 MQ 模型的平滑因子进行了研究, 提出了不同的确定方法<sup>[6]</sup>, 但仍然没有一个稳定的算法来求解平滑因子, 本文采用 Hardy 提出的算法初步确定平滑因子  $\delta$ , 见式(15)。然后通过实验数据进行标定, 求得最佳的平滑因子计算式:

$$\delta^2 = 0.665d^2 \quad (15)$$

其中,  $d$  为标定模板图像上(参考图像)光心部位相邻圆点质心之间的距离。

灰度插值法目前有邻近法、双线性插值法和三次插值法。邻近法精度不高, 三次插值法精度高但运算量大, 双线性插值可以折中邻近法和三次插值法, 但存在边缘差值不平滑问题。本文采用三次 B 样条插值法进行灰度重建。

综上所述, 摄像机镜头畸变校正的流程如图 2 所示。

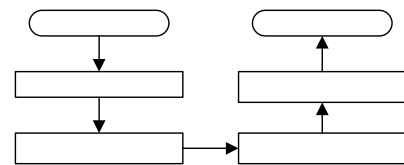


图 2 摄像机校正流程

### 3.2 校正模型实验对比

为评价本文提出的混合校正法的性能, 选取了经典校正模型、MQ 模型、二元三次多项式模型和 Gopfert 模型进行实验对比, 用校正后水平平均方根误差(RMS)、垂直 RMS、径向 RMS、水平最大偏差和垂直最大偏差等 5 个指标评价每个校

正模型的优劣, 选取 117 个点作为校正检验点, 实验的对比结果见表 1。

表 1 5 种模型的校正结果(像素)对比

校正模型	水平 RMS	垂直 RMS	径向 RMS	水平最大偏移	垂直最大偏移
经典模型	0.29	0.29	0.41	1.37	0.88
MQ 模型	0.32	0.27	0.42	0.99	0.92
二元三次多项式	0.21	0.19	0.29	0.61	0.51
混合模型	0.22	0.19	0.29	0.60	0.70
Gopfert 模型	0.23	0.19	0.30	0.79	0.99

由表 1 可知, 本文混合校正模型对畸变图像的校正效果与二元三次多项式相当, 且优于其他单一校正模型。Gopfert 模型相比二元三次多项式模型校正稍差, 表明 Gopfert 模型在镜头畸变校正方面的适用性和鲁棒性都不如混合模型校正方法。各模型对图 1(b)进行校正的结果见图 3。

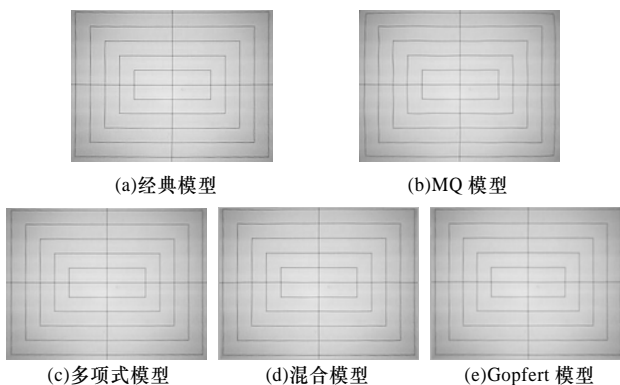


图 3 校正图像

### 3.3 数据分析

影响校正精度的因素很多, 主要有光学中心估计误差、圆点中心检测误差等。本文仅考虑畸变校正模型本身的因素。MQ 模型对控制点的依赖性较大, 导致本文方法校正的精度也依赖于控制点的数量及分布。另外, MQ 模型中的平滑因子也是影响校正精度的重要因素, 其最佳值取决于控制点的分布和畸变图像的变形程度。为了评价混合模型的平滑因子对校正精度的影响, 本文通过实验标定的方法绘制了平滑因子与校正误差的关系曲线, 见图 4。

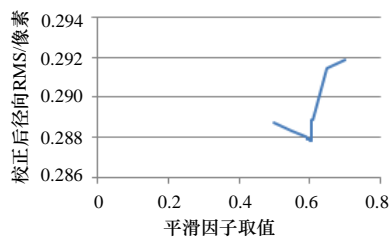


图 4 平滑因子与校正误差的关系

由图 4 可知, 平滑因子对校正的精度在局部范围内影响不大, 对于不同的模型, 图像变形程度不同, 其最佳的平滑因子值不同, 混合模型最佳的平滑因子系数在  $0.603d^2$  左右, 这个值与 Gopfert 提出的计算平滑因子系数一致。

另外, 实验所用的摄像头是市场上低成本、制造粗糙的摄像头, 短焦距中视场。如果换成设计良好、制造精密的摄像机, 可进一步提高校正的精度, 减少校正后径向 RMS。

## 4 结束语

本文提出了一种基于混合模型的摄像机镜头畸变校正方法, 该方法对经典模型稍作了修改, 结合多曲面拟合法对图像畸变进行校正。然后采用三次 B 样条函数对畸变图像进行灰度重建, 使图像校正后视觉效果良好, 校正的径向均方根误差进一步降低。该方法简便、实用, 不依赖 CCD 的内部参数和复杂的测量装置, 校正后的径向均方根误差达到亚像素级, 相比传统的单一校正模型, 该方法更具普适性和鲁棒性, 适用于大多数工业摄像机镜头畸变校正。

## 参考文献

- [1] Wang Jianhua, Shi Fanhuai, Zhang Jing, et al. A New Calibration Model of Camera Lens Distortion[J]. Pattern Recognition, 2008, 41(2): 607-615.
- [2] Thormahlen T, Broszio H. Automatic Line-based Estimation of Radial Lens Distortion[J]. Integrated Computer-Aided Engineering, 2005, 12(2): 177-190.
- [3] Zhang Zhengyu. A Flexible New Technique for Camera Calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.
- [4] Lin Jiaming, Xing Mailing, Sha Dingguo, et al. Distortion Measurement of CCD Imaging System with Short Focal Length and Large-field Objective[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2005, 43(10): 1137-1144.
- [5] Weng Juyang, Cohen P, Herniou M. Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(10): 965-980.
- [6] Fogel D N, Tinney L R. Image Registration Using Multiquadric Functions, the Finite Element Method, Bivariate Mapping Polynomials and Thin Plate Spline[R]. National Center for Geographic Information and Analysis, Tech. Rep.: 96-1, 1996.
- [7] Zhang Quanfa, He Jintian. Improving the Precision of Digital Distortion Correction of Wide-angle Imaging System[J]. Optical Technique, 2001, 27(3): 242-246.

编辑 张正兴

(上接第 186 页)

- [20] Killourhy K S, Maxion R A, Tan K M. A Defense-centric Taxonomy Based on Attack Manifestations[C]//Proc. of the International Conference on Dependable Systems and Networks. Florence, Italy: [s. n.], 2004.
- [21] Weber S, Karger P A, Paradkar A. A Software Flaw Taxonomy: Aiming Tools at Security[C]//Proc. of SESS'05. Louis, Missouri, USA: ACM Press, 2005.

- [22] Tsipenyuk K, Chess B, McGraw G. Seven Pernicious Kingdoms: A Taxonomy of Software Security Errors[J]. IEEE Security & Privacy, 2005, 3(6): 81-84.
- [23] Hansman S, Hunt R. A Taxonomy of Network and Computer Attack[J]. Computers and Security, 2005, 24(1): 31-43.

编辑 张帆